

不規則性不均質結合伝送路の特性に関する研究

著者	荒木 賢一
号	751
発行年	1979
URL	http://hdl.handle.net/10097/9487

氏 名	あら き けん いち 荒 木 賢 一
授 与 学 位	工 学 博 士
学 位 授 与 年 月 日	昭 和 5 5 年 3 月 2 5 日
学 位 授 与 の 根 拠 法 規	学 位 規 則 第 5 条 第 1 項
研 究 科 , 専 攻 の 名 称	東 北 大 学 大 学 院 工 学 研 究 科 (博 士 課 程) 電 気 及 通 信 工 学 専 攻
学 位 論 文 題 目	不 規 則 性 不 均 質 結 合 伝 送 路 の 特 性 に 関 す る 研 究
指 導 教 官	東 北 大 学 教 授 西 田 茂 穂
論 文 審 査 委 員	東 北 大 学 教 授 西 田 茂 穂 東 北 大 学 教 授 虫 明 康 人 東 北 大 学 教 授 安 達 三 郎 東 北 大 学 助 教 授 米 山 務

論 文 内 容 要 旨

第 1 章 緒 言

伝送線路間の分布結合の不規則な揺らぎに関する問題は、ミリ波から光波に至る領域で方向性結合器、モード励振器その他各種回路素子の解析、設計上極めて重要である。このような波長の短い領域では、回路の小型化に伴う加工精度の相対的劣化、伝送路材料の不均質、さらには振動、たわみなどの外乱によって生じる予測困難な特性の劣化が実用に際して問題になり、そのため高い製作精度、設置条件の慎重な配慮等が従来になく要求される。それ故、またこれに有効に対処するために種々の不規則な揺らぎをも考慮に入れた分布結合線路の解析および設計法が必要となるが、現在このような検討は十分ではない。

本研究は、製作精度そして設置条件なども考慮した設計法の基礎の確立を目的とし、不規則な揺らぎを含む分布結合線路の結合特性をモード結合理論および確率論に基づき詳細に検討したものである。従来、結合伝送系を結合方程式で記述するモード結合理論を用い、揺らぎを含む多モード伝送路の特性をモード変換の観点から取り扱った研究は数多い。しかし、分布結合線路の評価に際して重要な結合波の確率分布を詳細に検討した例はない。結合波の確率分布がわかればこれを利用して結合電力の平均値、分散など高次の統計量を一般的に求めることができ、また量産した場合の歩留まり率も計算できる。このように結合特性のより直接的な把握には結合波の確率分布を知ることが重要となる。そこで本研究では、主として結合波の確率分布に着目した理論解

析, さらに乱数を用いた計算機シミュレーションによって種々の不規則な揺らぎに対する統計的な結合特性を明らかにする。そしてこれをもとに分布結合線路の製作精度, 設置条件を考慮した設計法に対する指針を明らかにする。

第2章 位相定数が等しい伝送線路間の不規則結合に関する理論解析

本章では位相定数が等しい伝送線路で構成された分布結合線路において, 結合係数の不規則な揺らぎが結合特性に及ぼす影響を厳密な理論解析によって検討した。解析に際しては, まず結合係数の揺らぎがスペクトル密度 S_0 の白色雑音過程に従う場合を取り扱い, 後にこの場合の結果が任意の相関長の揺らぎに対しても簡単な補正または置換えで適用できることを示した。

一方の線路に単位振幅の波が入射したとき, 分布結合によって他方の線路に励起される結合波を考える。このとき, 結合波の統計的性質は結合線路長あるいは結合電力の平均値によって大きく変化し, とくに結合電力の確率分布はその平均値が1に近い値をとるときピークを持たない特異的な分布になり, 一方平均値が1/2付近のときは近似的に正規分布となることが明らかになった。これは, 結合電力の統計的性質が0 dB結合あるいは3 dB結合の場合で大きく異なり, したがって結合度に応じて確率分布を考慮した特性の評価が必要なことを示唆している。

つぎに結合波の振幅 $|I_2|$ の確率分布関数を利用して, 所望の結合量 k と揺らぎの大きさ S_0/C_0 (C_0 : 平均結合係数) との定量的な関係を求めた。0 dB結合を想定した場合 ($C_0 z = \pi/2$; z : 線路長) の数値例を図1に示している。図中 D_w は揺らぎの相関長を表すパラメータである。縦軸の確率 $P(|I_2| \geq k)$ はまた量産した場合の歩留まり率を表わしており, 揺らぎの影響は歩留まり率の低下となって現れることがわかる。横軸の S_0/C_0 は具体的な結合線路の構造誤差と対応を付けることができる。本論文ではこの例としてミリ波からサブミリ波帯での応用が期待される方形導波管結合線路を取り上げ, その結合部の構造誤差によって生じる結合係数の揺らぎを求めた。このように図1は分布結合線路の製作誤差と所望の結合量あるいは歩留まり率との関係を表している。これを利用して許容誤差の評価ができるなど, 結合線路に含まれる揺らぎの影響を考慮に入れた設計指針が具体的に得られる。

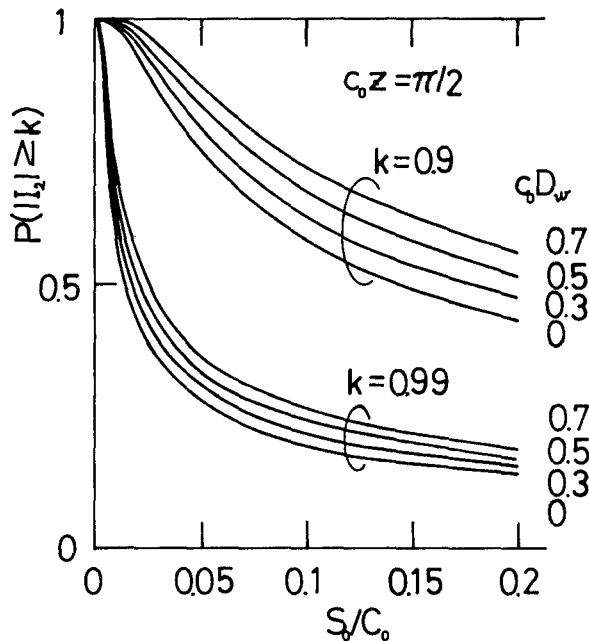


図1 確率 $P(|I_2| \geq k)$ と揺らぎの大きさ S_0/C_0 の関係

第3章 一般的な不規則性不均質を有する分布結合線路の理論解析

本章は、各線路の位相定数 β_1, β_2 が一般に異なり、そして結合係数 C および位相定数が共に揺らぐ分布結合線路を考察の対象とする。このような一般的な場合の結合特性を把握するには、従来知られている結合方程式の解析手法では不十分である。それ故、ここではまず行列指数関数を用いた新しい解析法を提示し、結合波の確率分布が容易に計算できるなどの利点を備えた解析的な近似解を与えた。これによれば結合波に関する諸量は、揺らぎが大きくなかつ実用的な結合長の範囲で、次式に示されるベクトル \vec{r} の成分を用いて簡単な形で求められる。

$$\begin{aligned}\vec{r} = & \int_0^z \vec{v}(s) ds + \int_0^z (2s - z) \langle \vec{v} \rangle \times \vec{v}(s) ds \\ & + \frac{1}{6} \int_0^z (3s^2 - z^2) \langle \vec{v} \rangle \times (\langle \vec{v} \rangle \times \vec{v}(s)) ds\end{aligned}\quad (1)$$

ここに、ベクトル \vec{v} は $\vec{v} = (r, C_r, C_i)$ 、 $r = (\beta_1 - \beta_2)/2$ 、 $C = C_r + jC_i$ で表され、また $\langle \vec{v} \rangle$ は \vec{v} の平均ベクトルである。式(1)は決定論的な問題に対してもその有用性が期待されるものである。つぎに、実際的な場合として結合係数および位相定数の揺らぎがガウス型相関関数を有する正規定常確率過程に従う場合を考え、式(1)を利用して結合電力の確率密度関数、平均値および分散の計算式を導出した。

ここでは結合係数 C 、位相定数差 r の分散の割り合いおよびそれらの平均値の比 r_0/C_0 が、分布結合線路における製作精度上の要点あるいは揺らぎの影響が少ない構造等に関する指針を得るための重要なパラメータとなる。このことに焦点を置いて 0 dB、3 dB 方向性結合器における結合電力の揺らぎに関して数値計算を行った結果以下のようなことが明らかになった。

0 dB 方向性結合器では、分散の和 $\sigma_0^2 = \sigma_c^2 + \sigma_r^2$ が一定のとき結合電力の分散は $\sigma_r^2/\sigma_0^2 = 0$ のとき最大、 $\sigma_r^2/\sigma_0^2 \approx 0.8$ のとき最小となり、その比は相関長および σ_0^2 の値にほとんど依存せず 6 ～ 7 の値をとる。これより結合係数の揺らぎが結合特性に対してより大きな影響を及ぼすことがわかった。一方、3 dB 方向性結合器では、各線路の位相定数が異なり $r_0/C_0 = 1$ を満たす線路構成のとき、他の構成たとえば $r_0/C_0 = 0$ の場合に比べ広い結合長に渡って高い確率で結合量の設定値が実現されることがわかった。このことは、3 dB 方向性結合器における揺らぎの影響の軽減方法を示唆しており、重要な成果の 1 つである。たとえば、同種の誘電体スラブ伝送路で構成された結合線路の場合、結合部において誘電体を一方の線路に装荷し各線路の位相定数に差を設けるようにすれば良い。誘電体スラブ結合線路を例にとり具体的な数値例を調べた結果、このような改善は十分に期待できることがわかった。

第4章 不規則性不均質を有する分布結合線路の計算機によるシミュレーション

乱数を用いた計算機シミュレーションによって、理論解析が困難な場合も含めて種々の不規則な揺らぎを含む分布結合線路の結合特性を直接的に検討することができる。シミュレーションの手順としては、まず電子計算機で大量に生成した良質な乱数の系列に種々の処理を施し、所望の

性質を有する確率過程として結合係数および位相定数を構成する。つぎに、このような互いに独立な多数の標本それぞれについて結合方程式の解を数値的に求め、各種統計量を計算する。数値解法については、行列の対角比に基づく手法によって結合方程式の効率良い計算法を導入した。結合波に関する諸量は Riccati の微分方程式

$$-j \frac{dy}{dz} = Cy^2 + 2ry - C^* \quad (2)$$

の解 y を用いて代数的計算で得られ、結合方程式の直接解法よりも計算時間は約 $\frac{1}{4}$ に短縮される。

以上の手続きにより、種々の揺らぎを含む分布結合線路のシミュレーションが可能となり、ここでは結合係数および位相定数の揺らぎが、(1)正規確率分布に従う場合、(2)一様確率分布に従う場合、そして(3)揺らぎの確率的性質が線路に沿って変わる場合についてそれぞれ検討を行った。ただし、各揺らぎの相関関数はガウス型相関関数（相関長 ℓ ）を持つものとし、これは離散的フーリエ変換の手法によって乱数の系列に与えている。

検討の結果、(1)では第3章における理論解析の有効性が明らかになった。図2に理論とシミュレーションの比較例を示している。また(2)では一様分布に従う揺らぎの場合でも第3章の理論を適用し得ることがわかった。(3)は実際の線路の設置条件に関連して重要であり、またこの場合は理論解析が困難である。各揺らぎの分散が、(A)線路中央部あるいは(B)線路の両端で大きくなっている 0 dB、3 dB 方向性結合器における結合電力の揺らぎの大きさを図3に数値例として示した。この数値例並びに結合係数が異なる線路を3段縦続接続した構成の 0 dB 結合線路のシミュレーション結果とから、方向性結合器において結合電力の揺らぎを小さくするには、単位長当りの電力の平均移行率が大きい結合領域の精度向上が十分効果的であると結論された。

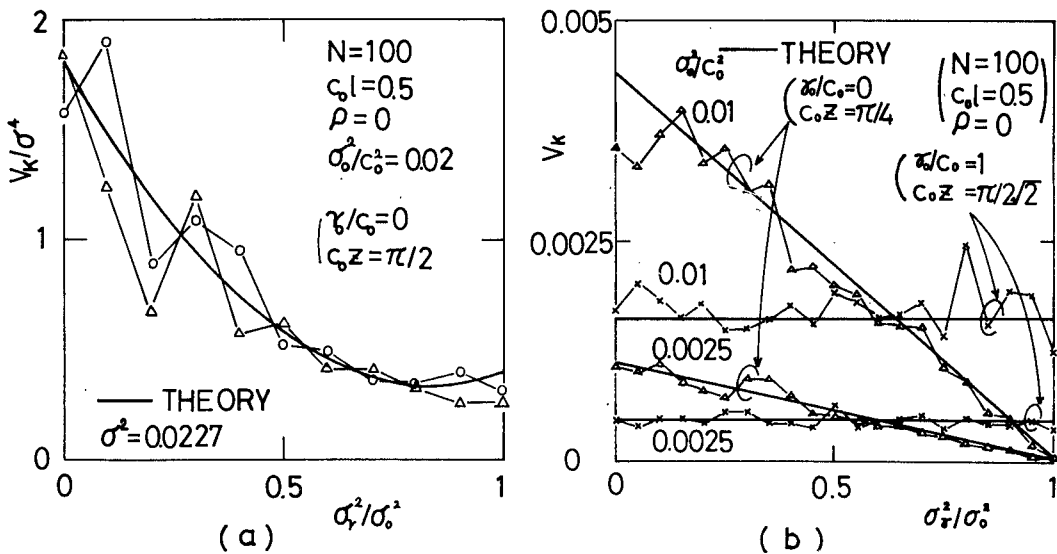


図2 (a) 0 dB 方向性結合器、(b) 3 dB 方向性結合器における結合電力の分散 V_k と揺らぎの混合比 σ_r^2/σ_0^2 ($\sigma_0^2 = \sigma_c^2 + \sigma_r^2$) の関係（理論とシミュレーションの比較）

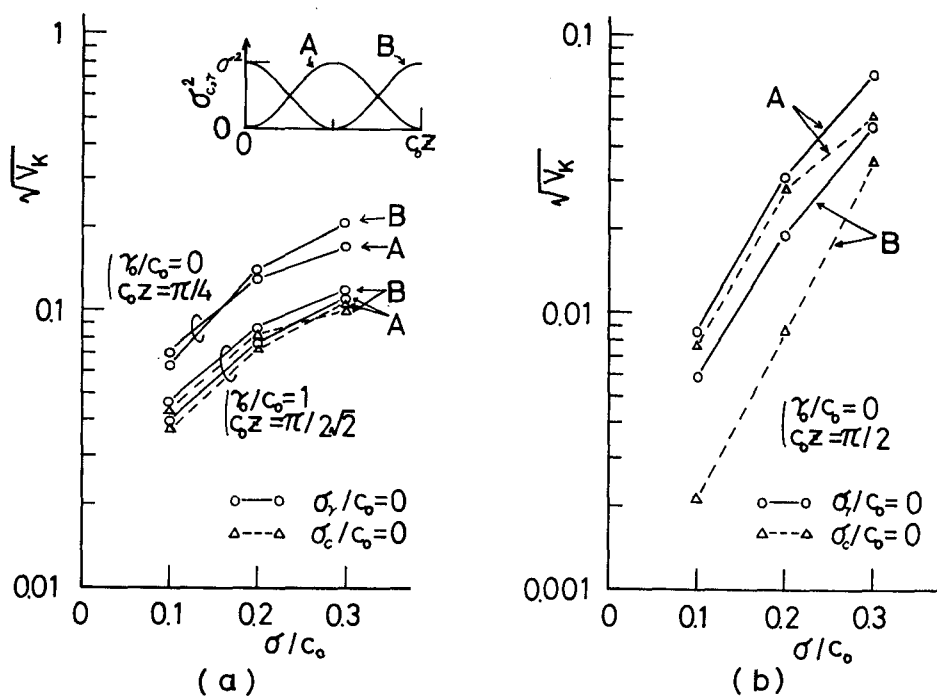


図3 結合電力の標準偏差 $\sqrt{V_K}$ ，(a)3 dB方向性結合器，(b)0 dB方向性結合器

第5章 結 言

モード結合理論および確率論に基づき，不規則な揺らぎを含む分布結合線路の結合特性を詳細に検討した。結合特性が統計的に明らかになり，これから分布結合線路の許容誤差，揺らぎの影響が少ない線路構成，製作精度の割り当て方など実的な分布結合線路の設計法に関する有用な指針が得られた。

審 査 結 果 の 要 旨

結合伝送路の基本的な特性は既に十分解明されている。しかしながら、波長が極めて短いミリ波から光波にわたる波長帯では、結合伝送路の微細な構造誤差が波長に比べて無視できず、これが位相定数、結合係数にランダムなゆらぎを誘起し、結合特性の劣化をもたらす。結合伝送路の設計、製作に際しては、これらのランダムな構造誤差の影響を定量的に把握することが必要である。

このような観点から著者は、不規則性不均質結合伝送路の特性解明を目的として、ランダム結合方程式の解析に有効な手法を新たに導入し、また計算機シミュレーションを併用するなどして、結合波の統計的諸特性について詳細に検討した。本論文はその成果をまとめたもので、全編5章よりなる。

第1章は緒言である。第2章では主として導波管結合伝送路を念頭に置き、結合係数のみにランダムなゆらぎがある結合伝送路を厳密に解析している。そして、結合波の振幅および電力の確率分布関数を誘導し、それをもとに、結合伝送路を製作した場合の良品率を求めるなど、実用的にも興味ある成果を得ている。

第3章では位相定数、結合係数にランダムなゆらぎがある場合について考察しているが、これは光回路などで重要な結合誘電体伝送路を対象としたものである。結合方程式を逐次近似的に解き、それによって結合波の統計的特性を解明し、さらに、結合伝送路の構造誤差と位相定数、結合係数のゆらぎの関係にも言及して、理論の実際的な応用を計っている。その結果、3 dB方向性結合器では位相定数の異なる伝送路を組合せた方が構造誤差の影響が小さく有利であることを見出している。これは重要な知見である。

第4章では、不規則性不均質結合伝送路の計算機シミュレーションについて述べている。結合方程式の解をシミュレーションに適した形で求め、それを利用して第2章、第3章の結果を数値実験的に検証し、さらに、解析的な取扱いが困難な場合についても種々の興味ある資料を得ている。第5章は結言である。

以上要するに、本論文は結合伝送路のランダムな構造誤差が結合特性に及ぼす影響を統計的手法や計算機シミュレーションを用いて考察し、結合器の構成に関し興味ある知見を得るとともに、結合伝送路の製作に要求される精度について、統計論的基礎を与えたもので、電波伝送工学に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。